ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ ЗА РУБЕЖОМ

НОВОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ МЕХАНИЗМА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

ЦИНТИ

МОСКВА — 1962

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР
ПО КООРДИНАЦИИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ

НОВОЕ ОБ"ЯСНЕНИЕ МЕХАНИЗМА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

П е р е в о д

Центральный институт научно-технической информации
электротехнической промышленности и приборостроения

Москва 1962

П-6035
ТС-2

К печати Об"ем 1,0 п.л., уч.-изд.л. 0,82
Тираж 3200 Цена 9 коп. Заказ № 905
Тип.ЦИНТИЭЛЕКТРОПРОМ, Москва, Е-123, 2-й Плехановский туп.,12

621.315.614.6+621.315.615.2.001.5

НОВОЕ ОБ"ЯСНЕНИЕ МЕХАНИЗМА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Krasucki Z., Churcn H.F., Carton C.G. - A new explanation of gas evolution in electrically stressed oil-impregnated paper insulation. - J. Electrochem. Soc. 1960. VII. T.107. N 7. C.598-602. 7 илл. Библиогр. 8 назв.

Несмотря на применение в изоляционной технике самых разнообразных материалов, пропитанная маслом бумага все еще широко употребляется для изолирования высоковольтных кабелей и обмоток трансформаторов, а также в качестве диэлектрика в конденсаторах, т.е. там, где важны надежность в работе при умеренных температурных режимах и низкая стоимость.

В тех случаях, когда из изоляции, находящейся под действием переменного электрического поля высокого напряжения, удалены все газовые включения, срок ее службы достаточно продолжителен.

Известно, что в маслопропитанной бумажной изоляции электрические разряды возникают при значениях напряженности поля, превышающих критические величины E_i, даже при условии качественной пропитки изоляции, обеспечивающей отсутствие в ней первоначальных пустот.

Если напряженность поддерживается на уровне возникновения разрядов в изоляции, то эти разряды быстро возрастают и в течение первой минуты могут достигнуть значений, превосходящих исходное значение в несколько раз; при этом продолжительность службы изоляции может быть сильно снижена. Величина E_i находится в прямой зависимости от гидростатического давления масла, но при сравнении различных партий бумажно-масляных конденсаторов при одинаковом давлении (нормальное атмосферное) средние величины E_i колебались в интервале 5:1. Причины столь больших расхождений неизвестны. Влияние на величину напряженности поля, при которой появляются разряды, таких факторов, как плотность и тип бумаги (бумага из тряпья или крафт-бумага), а также вязкость и иодное число масла, относительно невелико [1].

Если рассматривать под микроскопом пропитанную маслом бумагу, находящуюся под действием высокого напряжения, то можно заметить, что возникновение разрядов совпадает с моментом появления в масле газовых пузырьков.

Для выяснения вопроса о том, какая часть сложного бумажно-масляного диэлектрика способствует возникновению газовыделения при условии первоначального отсутствия газовых пузырьков, а также для об"яснения механизма этого процесса было проведено систематическое исследование.

В случае возникновения электрических разрядов внутри уже имеющегося пузырька они вызывают дальнейшее газообразование за счет разложения масла, и в результате этого размеры пузырька увеличиваются. В настоящей работе не рассматривается вопрос о скорости газообразования в масле после начала ионизации газа. Последнее явление хорошо изучено и известно, что оно зависит от химического состава масла и наличия соответствующих присадок, и для выбора масел, обладающих устойчивостью к действию разрядов, были разработаны испытания масла на газообразование.

Особенностью настоящей работы является попытка исследования первичного процесса образования первых газовых пузырьков.

Вначале были изучены условия, при которых газ может выделяться из масла, находящегося под действием высокого напряжения. В дальнейшем эти же условия были изучены и для твердых диэлектриков: конденсаторной бумаги, целлофана, полиэтилена, полистирола, полиэтилентерефталата, стекла и слюды, находящихся в масле или другом жидком диэлектрике.

Испытания изоляционного масла

В тех случаях, когда масло полностью отфильтровано от механических примесей и не пересыщено растворенным газом, при приложении высокого напряжения, создаваемого погруженными в масло металлическими электродами, газовыделение обычно не происходит, если одновременно с этим не происходит пробой масла. Известны следующие исключения.

I. Газовыделение под действием высокого напряжения начинается при очень низком давлении даже из обезгаженного масла [2], но происхождение первичной фазы не известно.

II. Если один из электродов представляет собой очень острую иглу (радиусом I мк или меньше), а расстояние между электродами

составляет несколько миллиметров, то возможен местный пробой масла у острия, сопровождаемый газовыделением, хотя при этом сплошной пробой в масле не развивается. Образующиеся в таких условиях в обычных трансформаторных и конденсаторных маслах газовые пузырьки движутся от острия с такой большой скоростью, что за ними трудно наблюдать.

При использовании очень вязких электроизоляционных жидкостей продукты, выделяющиеся из масла в результате местного пробоя (углерод и газовые пузырьки), остаются в этой же зоне, и каналы, по которым развивается пробой, могут распространяться в направлении от острия и в конце концов привести к общему пробою.

Три проводящих канала, возникших в описанных условиях в гексахлордифениле, показаны на рис.I.

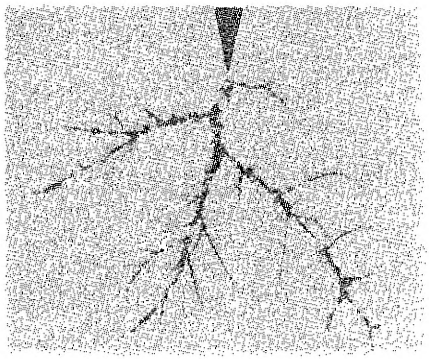

Рис.I. Каналы, по которым развивается пробой в гексахлордифениле

Такие особые способы возникновения газовыделения, по всей вероятности, не наблюдаются в обычных бумажно-масляных диэлектриках, т.е. в конденсаторах и кабелях.

Во-первых, эти системы работают при давлениях, близких к атмосферному или превышающих его. Во-вторых, прилагаемое напряжение обычно недостаточно по своей величине для инициирования местного пробоя, происходящего в том случае, когда диэлектрик содержит проводящие включения или другие локализованные дефекты, ведущие к его разрушению при испытании. Газовыделение, механизм которого обсуждается ниже, и разрушение, наступающее под действи-

ем разрядов, происходят при более низком напряжении, чем это требуется для разрушения диэлектрика.

Приведенные здесь соображения намечают пути повышения напряжения, появления разрядов в бумажно-масляной изоляции и, следовательно, увеличения рабочего напряжения.

Влияние напряжения на сложный диэлектрик, состоящий из твердых и жидких компонентов

Наличие влажных волокон целлюлозных материалов в промежутке между электродами, находящимися в масле, обусловливает возникновение газообразования при сравнительно невысокой напряженности поля. Газовые пузырьки образуются только в том случае, если волокна составляют цепочку-мостик между электродами, и выделение газа наблюдается на участках соприкосновения волокон и электродов. Выделение газа отмечалось также в тех местах, где волокна соприкасаются друг с другом и образуют мостики в межэлектродном пространстве.

Для уяснения причины этого явления были изучены различные сочетания твердых и жидких диэлектриков. При этом употреблялись твердые изоляционные материалы в виде тонких листов и электроды простой формы.

В первом опыте пластинка испытуемого твердого диэлектрика прикреплялась к плоскому электроду прибора для испытания, показанного на рис.2.

Второй электрод представляет острие радиусом 40 мк и может передвигаться относительно плоского электрода. Межэлектродное пространство можно наблюдать в микроскоп через специальное окно. Прибор для испытаний сконструирован таким образом, что позволяет осуществлять вакуумную пропитку изоляционной конструкции жидким диэлектриком. В случае необходимости в приборе можно проводить испытания при пониженном давлении.

При опытах, проведенных при атмосферном давлении, были установлены нижеследующие закономерности.

I. В том случае, когда прибор наполнен профильтрованным минеральным маслом, газовыделение не наблюдается при величине напряжения, ниже пробивного, до тех пор, пока существует зазор между острием и твердым диэлектриком, соприкасающимся с плоским электродом.

II. При соприкосновении острия (игольчатого электрода) с невысушенной твердой целлюлозной изоляцией (целлофан или бумага

выдерживались при комнатной температуре в атмосфере окружающего помещения) наблюдалось непрерывное выделение мелких газовых пузырьков в месте контакта при напряжении, превышающем критическое.

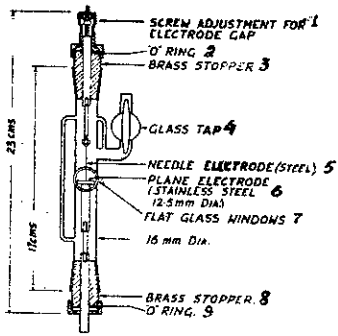

Рис.2. Испытательный прибор

I – винт для установки зазора между электродами; 2 – кольцо; 3– латунная пробка; 4 – стеклянный кран; 5 – игольчатый электрод (сталь); 6 – плоский электрод (нержавеющая сталь) диаметром 12,5 мм; 7 – смотровое окно; 8 – латунная пробка; 9 – кольцо

На рис.3 показано газовыделение в точке соприкосновения между игольчатым электродом и пластинкой целлофана, погруженной в минеральное масло.

Газовые пузырьки быстро передвигаются в направлении от острия и благодаря наличию обезгаженного масла растворяются в нем в течение нескольких минут. Описанное явление наблюдается в электрическом поле постоянного и переменного тока, но не обязательно при одинаковых значениях приложенного напряжения.

Начало газовыделения совпадает с "возникновением разрядов", что обнаруживается при соединении системы с детектором разрядов.

Ш. Значения критического напряжения, при котором наступает газовыделение, возрастают с уменьшением влажности целлюлозы.

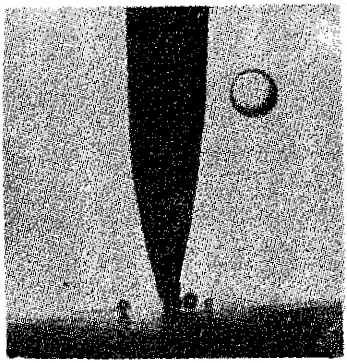

Рис.8. Выделение газа в точке соприкосновения между игольчатым электродом и твердым диэлектриком (целлофан)

В целлюлозе (бумага или целлофан), влажность которой находится в состоянии равновесия с влажностью воздуха, почти полностью насыщенного водяными парами, газовыделение начинается при напряженности поля 6–7 в/мк.

Для целлюлозы, которая находилась в атмосфере обычного помещения (относительная влажность воздуха равна, например, 65%), критическая напряженность значительно выше (около 70 в/мк для двух слоев конденсаторной бумаги толщиной по 10 мк) и возрастает в несколько раз при дальнейшем уменьшении влажности. В очень сухой бумаге или целлофане газовыделение не наблюдается до критических значений, соответствующих пробивному напряжению (280 в на 1 мк для двух слоев бумаги толщиной по 10 мк).

Значительно меньшие величины критической напряженности, наблюдающейся в реальных конденсаторах с совершенно сухой изоляционной бумагой, обусловлены, по всей вероятности, случаями местного повышения напряжения за счет проводящих частиц.

Влияние увеличения продолжительности печной сушки на величину напряжения V_g, при которой начинается газовыделение при соприкосновении игольчатого электрода с целлофаном толщиной 75 мк (предварительно выдержанным в условиях атмосферной влажности), показано на рис.4.

IУ. В твердых диэлектриках, обладающих относительно низким водопоглощением, например в полиэтилене, полиэтилентерефталате, политетрафторэтилене, слюде и стекле, не наблюдается газовыделение при напряженностях, приближающихся по величине к пробивной (в большинстве случаев 400–600 в/мк) даже после их длительной выдержки в атмосфере с высокой влажностью.

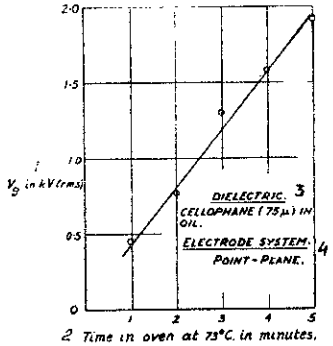

Рис.4. Зависимость величины минимального напряжения начала газовыделения (V_g) от влажности целлофана, погруженного в масло

I – V_g (эффективное напряжение), кв; 2 – время выдержки в печи при +73°С, мин; 3 – диэлектрик-целлофан (75 мк) в масле; 4 – система электродов: острие-плоскость

Значения напряжений, которые могут быть приложены к этим материалам при отсутствии газовыделения или пробоя после пребывания их в атмосфере с почти 100%-ной относительной влажностью в течение 0,5–I ч., приведены в табл. I.

Таблица I

Выделение газа из твердых диэлектриков, выдержанных во влажной атмосфере

Материал	Толщина, мк	Поведение под влиянием высокого напряжения	Напряженность газовыделения, в/мк (ампл.)
Полиэтилен	45	Пузырьки газа не выделяются до пробивного напряжения 3,4 кв (ампл.)	>76

Продолжение табл. I

Материал	Толщина, мк	Поведение под влиянием высокого напряжения	Напряженность газовыделения, в/мк (ампл)
Полистирол	I2	Пузырьки газа не выделяются до напряжения 7 кв	>580
Полиэтилентерефталат	I2	Пузырьки газа не выделяются до напряжения 4,7 кв (ампл.)	>390
Политетрафторэтилен	I7	Пузырьки газа не выделяются до напряжения 7 кв (ампл.)	>4I0
Слюда	I0	Пузырьки газа не выделяются до пробивного напряжения 5,4 кв (ампл.)	>540
Стекло	I50	Пузырьки газа не выделяются до пробивного напряжения I0 кв (ампл.)	>67
Конденсаторная бумага	I0	Пузырьки газа выделяются примерно при 70 в (ампл.)	7
Целлофан	75	Пузырьки газа выделяются при 420 в (ампл.)	6
Триацетат целлюлозы	30	Пузырьки газа выделяются при 570 в (ампл.) (BDV = 2,46 кв (ампл.)	I9
Желатина	33	Пузырьки газа выделяются при 280 в (ампл.)	7

В этой же таблице приведены величины напряженности газовыделения для целлюлозных материалов, выдержанных во влажной атмосфере перед погружением в масло.

У. Для материалов с высоким водопоглощением, например для триацетата целлюлозы и желатины, а также для целлофана и бумаги, для которых наблюдается газовыделение во влажном состоянии при низком напряжении, с уменьшением влажности отмечается увеличение напряженности, соответствующей началу газовыделения. Соответствующие данные для триацетата целлюлозы и желатины, выдержанных во влажной атмосфере, включены в табл. I.

УI. Газовыделение из неполностью высушенной целлюлозы под действием электрического поля наблюдается при замене минерального

масла кремнийорганической жидкостью, четыреххлористым углеродом, пентахлордифенилом или сероуглеродом, причем минимальное напряжение, соответствующее началу газовыделения, в основном не зависит от изменения жидкой среды.

Сероуглерод особенно интересен с той точки зрения, что он не должен образовывать газообразных продуктов разложения. В этом случае газовые пузырьки могут выделяться непосредственно вследствие разложения твердого материала или содержащейся в нем влаги.

В связи с тем, что величина напряжения, при котором газ выделяется из пропитанной маслом целлюлозы, возрастает с улучшением степени сушки целлюлозы, можно увеличить величину напряжения, соответствующего возникновению разрядов в конденсаторах с пропитанной маслом бумагой, путем особо тщательной сушки диэлектрика. В связи с этим были проведены измерения величин сопротивления и напряжения начала разрядов в образцах бумаги из тряпья, высушенных до различной степени. Высушенную в вакууме бумагу увлажняли до требуемых пределов, немедленно погружали в масло и собирали под маслом небольшой конденсатор с алюминиевыми электродами. В качестве электродов употребляли плоскую фольгу толщиной 6 мк, площадь соприкосновения электродов с диэлектриком составляла 4 $см^2$.

Напряжение появления разрядов при переменном токе измерялось детектором с чувствительностью 0,5 пк. Результаты, приведенные на рис.5, показывают зависимость напряженности электрического поля, при которой наблюдается появление разрядов E_i, от сопротивления маслопропитанной бумаги.

Величина E_i возрастает в 4 раза с увеличением сопротивления при переходе бумаги из состояния, соответствующего равновесному с атмосферными условиями, к "сухому".

Величины сопротивлений, приведенных на рис.5, значительно ниже, чем соответствующие сопротивления для обычных круглых бумажных конденсаторов. Это обусловлено более плотным сжатием бумаги при испытаниях, обеспечившим тесный контакт между ее листами.

В дополнение к описанным выше испытаниям конденсаторов с плотной упаковкой, несколько конденсаторов из крафт-бумаги емкостью по 0,02 мкф (4 слоя бумаги толщиной по 10 мк) были пропитаны конденсаторным маслом в лабораторных условиях.

Величины сопротивления образцов такой изоляции перед пропиткой изменялись при вакуумной сушке конденсаторов в различной степени.

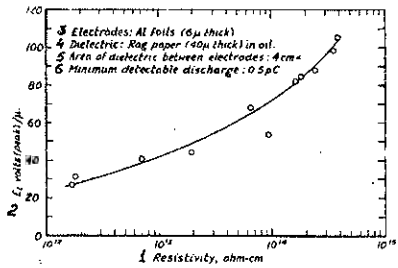

Рис.5. Изменения величины напряженности появления разрядов (E_i) в зависимости от сопротивления пропитанной маслом бумаги

I – сопротивление, ом.см; 2 – E_i, в/мк (ампл.); 3 – электроды: алюминиевая фольга (толщина 6 мк); 4– диэлектрик: бумага из тряпья (толщиной 40 мк) в масле; 5 – площадь диэлектрика между электродами 4 см^2; 6 – минимальная величина обнаруживаемых разрядов 0,5 пк

Было проведено только несколько испытаний, но результаты, приведенные на рис.6, показывают, что чем тщательнее выполнен процесс сушки, тем выше величина E_i конденсатора.

Несмотря на то, что точного измерения содержания влаги в бумажной изоляции этих конденсаторов не производилось, результаты данной работы, а также других работ позволяют заключить, что величина E_i возрастает от I5 до I00 в/мк (ампл.) по мере того, как содержание влаги уменьшается с нескольких процентов до величин менее 0,I%.

Обсуждение результатов

Приведенные в настоящей работе данные подтверждают, что первичное образование газа в пропитанной жидким диэлектриком бумаге, находящейся под действием высокого напряжения, происходит за счет воды, присутствующей в целлюлозе.

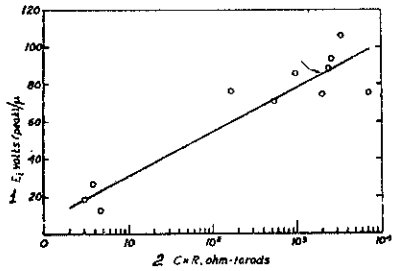

Рис.6. Зависимость напряженности, при которой появляются разряды (E_i) в конденсаторах из крафт-бумаги (C =0,02 мкф), от постоянной времени (RC)

I - E_i, в/мк (ампл.); 2 - постоянная времени конденсатора RC, ом.ф (сек)

В том случае, если газовые пузырьки первоначально отсутствуют, пороговые значения напряженности электрического поля, вызывающей газовыделение при нормальном давлении, являются низкими только для пропитанных материалов, содержащих заметные количества поглощенной влаги, и возрастают при сушке.

Образующийся газ не представляет собой паров воды, которые могли бы образоваться, например, вследствие местного перегрева в точках соприкосновения электродов или электропроводящих включений с целлюлозой. Дело в том, что пузырьки пара, образующиеся таким путем, конденсировались бы в мелкие капельки в течение доли секунды, тогда как продолжительность существования наблюдаемых пузырьков исчисляется минутами.

Вода, находясь в жидкой фазе, может легко подвергаться электролизу и разлагаться с образованием составляющих ее газов при частоте 50 гц и достаточной плотности тока.

Опыты, в которых газ, выделяющийся из влажной , находящейся под напряжением бумаги, был собран над поверхностью изоляционной жидкости, свидетельствуют о том, что из воды под воздействием как постоянного, так и переменного тока (50 гц) образуется взрывоопасная смесь кислорода и водорода, хотя внутри минерального масла

может происходить немедленное поглощение части кислорода вследствие окисления масла. Средняя плотность тока утечки пропитанного маслом бумажного конденсатора является, однако, недостаточной для об"яснения наблюдаемой скорости газовыделения при напряжении возникновения разрядов на базе электролиза воды [3], если не существует механизма, вызывающего значительное увеличение тока в нескольких очень небольших участках, в которых имеются необычные напряжения.

Такие местные повышения проводимости не могут быть об"яснены движением влаги по направлению к области с большей напряженностью поля. Теоретические соображения, основанные на учете энергии сорбции воды целлюлозой, также исключают такое об"яснение как основное даже при напряженности электрического поля такого порядка, который соответствует электрической прочности целлюлозы. Экспериментальные результаты подтверждают это положение.

Испытания, проведенные с образцами бумаги с различной влажностью, показывают, что проводимость бумаги возрастает весьма значительно при приближении величины измерительного напряжения к пробивному, особенно для образцов очень влажной бумаги. На рис. 7 показано изменение сопротивления при его определении при постоянном токе в зависимости от величины измерительного напряжения для конденсаторной крафт-бумаги толщиной 20 мк (2 слоя по 10 мк), площадью 28 $м^2$ после кондиционирования образцов в атмосфере с различной влажностью.

Отмеченное большое увеличение электропроводности влажной целлюлозы при высокой напряженности поля может быть результатом электронной эмиссии из электродов, причем электронная бомбардировка целлюлозы вызывает в свою очередь диссоциацию молекул связанной воды.

Хотя максимальные значения напряженности электрического поля, приведенные на рис.7, не превышают 500 кв/см, местные величины напряженности могут быть в несколько раз больше. Последнее обусловлено концентрацией силовых линий у острия электрода, или наличием микроскопических дефектов на электродах, или неоднородной толщиной бумаги, или, наконец, наличием электропроводящих включений. Несомненно, что напряженность электрического поля более 1 Мв/см должна быть вполне достаточной, чтобы вызвать электронную эмиссию.

Таким образом, возможно, что выделение газа в конденсаторе начинается в точках, где существуют местные перенапряжения, т.е. там, где имеются электропроводящие включения в бумаге, или у острия электрода, так как именно в этих местах вследствие сильной диссоциации воды должен произойти быстрый электролиз.

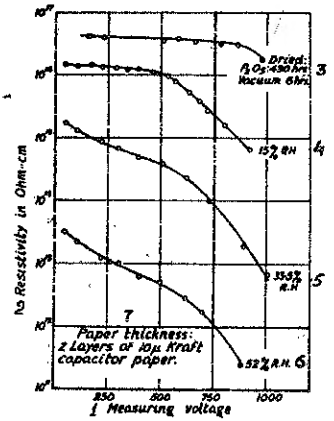

Рис.7. Влияние величины измерительного напряжения на сопротивление образцов бумаги с различной влажностью.

I - измерительное напряжение; 2 - сопротивление, ом.см; 3 - сушка над P_2O_5 в течение 430 ч, сушка в вакууме в течение 6 ч; 4 - 15%-ная относительная влажность воздуха; 5- 33,5%-ная относительная влажность воздуха; 6 - 52%-ная относительная влажность воздуха; 7 - толщина бумаги: два слоя конденсаторной крафт-бумаги толщиной по 10 мк

Подобный механизм явления может об"яснить, почему величина напряженности электрического поля, соответствующая началу разрядов в бумажно-масляном конденсаторе, мало зависит от времени приложения поля постоянного тока или частоты поля переменного тока, а также от температуры, несмотря на то, что последняя оказывает весьма значительное влияние на величину тока утечки при рабочей напряженности поля. В хорошо герметизированном конденсаторе изменение температуры может оказать косвенное воздействие на величину

напряженности поля, при которой появляются разряды, обусловленное изменением давления, но при постоянном давлении температурный эффект весьма мал.

Таким образом, ясно, что простой электрохимический механизм, основанный на средних значениях тока при рабочих напряженностях, недостаточен для об"яснения явления газовыделения, тогда как гипотеза электронной эмиссии при высокой напряженности поля находится в соответствии с экспериментальными данными.

Практическое значение данного исследования заключается в том, что в нем доказывается важность очень тщательной сушки пропитанной маслом бумажной изоляции для обеспечения максимально возможных рабочих напряженностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cucka P. – Electrical Research Association Technical Report Ref. L/T356. 1957.

2. Basseches H., Barnes M.W. – Ind. Eng. Chem., 1958, vol.50, p.959.

3. Church H.F., Garton C.G. – Proc. IEE., 1953, vol.100, part IIA, p.111.

Переводчик М.И.Шахнович

Редактор Т.Г.Леви